

0- 798152

На правах рукописи



НАСЫБУЛЛИН АЙДАР РЕВКАТОВИЧ

**РАЗРАБОТКА И ИССЛЕДОВАНИЕ СВЧ-УСТРОЙСТВ
ДЛЯ ТЕХНОЛОГИЙ ПЕРЕРАБОТКИ ПОЛИЭТИЛЕНТЕРЕФТАЛАТА**

Специальность 05.12.07 – Антенны, СВЧ - устройства и их технологии

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Казань 2012

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего профессионального образования «Казанский национальный исследовательский технический университет им. А.Н. Туполева – КАИ» на кафедре телевидения и мультимедийных систем и в НИИ прикладной электродинамики, фотоники и живых систем.

Научный руководитель: доктор технических наук, профессор
Морозов Олег Геннадьевич

Официальные оппоненты: Седельников Юрий Евгеньевич,
доктор технических наук, профессор
ФГБОУ ВПО «Казанский национальный исследовательский технический университет им. А.Н. Туполева – КАИ», профессор

Осипов Олег Владимирович,
доктор физико-математических наук, профессор
ФГБОУ ВПО «Поволжский государственный университет телекоммуникаций и информатики», профессор

Ведущая организация: ФГБОУ ВПО «Саратовский государственный технический университет имени Гагарина Ю.А.»

Защита состоится 16 ноября 2012 года в 14 часов на заседании диссертационного совета Д 212.079.04 в Казанском национальном исследовательском техническом университете им. А.Н. Туполева-КАИ по адресу: 420111, г. Казань, ул. К. Маркса, д.31/7.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Казанского национального исследовательского технического университета им. А.Н. Туполева-КАИ.

Отзывы на автореферат в 2-х экземплярах, заверенные печатью организации, высылать по адресу: 420111, г. Казань, ул. К. Маркса, д. 10 на имя ученого секретаря диссертационного совета Д 212.079.04.

Автореферат разослан 16 октября 2012 года.

Ученый секретарь
диссертационного совета

Седов С.С.

НАУЧНАЯ БИБЛИОТЕКА КФУ



0000741967

1. ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность. Важнейшей проблемой охраны окружающей среды и обеспечения жизнедеятельности человека является утилизация и переработка вторичной, бывшей в употреблении полимерной продукции, в общем случае представляющей собой твердые бытовые или промышленные отходы. Несмотря на то, что содержание пластмассовых отходов в общей массе утилизируемых веществ относительно невелико (примерно 7-8% по весу), характерный для этого типа отходов низкий удельный вес делает их наиболее заметными (18-20% по объему). Из всех выпускаемых пластиков 41% используется при производстве упаковок, из этого количества 47% расходуется на упаковку пищевых продуктов. Наиболее используемым полимером является полиэтилентерефталат (ПЭТФ). По мере того как спрос на ПЭТФ растет, естественно увеличивается количество отходов. Сегодня отходы ПЭТФ составляют более 30% от всех отходов пластмассы. Срок естественного разложения ПЭТФ составляет около 300 лет, что однозначно диктует необходимость их утилизации и переработки.

В настоящее время существуют и разрабатываются различные технологии переработки ПЭТФ. Наиболее перспективными направлениями считаются механическая и химическая переработка, каждое из которых характеризуется своими достоинствами и недостатками. Механическая переработка обеспечивает простое вторичное использование отходов при определенных потерях в их свойствах и увеличенных рисках негативного воздействия на окружающую среду и человека. Химический метод заключается в деполимеризации отходов ПЭТФ при взаимодействии с различными реакционными агентами при высокой температуре с целью получения мономеров, пригодных как для изготовления различных пластмасс, так и для повторного синтеза ПЭТФ. Данный метод требует определенных энергетических затрат и использования химических реагентов, однако, позволяет из сырья более низкого качества получать изделия, сходные по свойствам с изделиями из первичного ПЭТФ и по более низкой стоимости. В связи с этим исследования и разработка перспективных химических технологий переработки ПЭТФ, отличающихся меньшими энергетическими затратами и экологической чистотой, является одним из актуальных и приоритетных направлений развития науки и техники развитых государств.

Существенное улучшение качества протекающих реакций при химической переработке ПЭТФ, снижение энергетических затрат и сокращение продолжительности теплового воздействия можно обеспечить путем использования энергии электромагнитного поля СВЧ-диапазона.

Исследованиям данного вопроса посвящены труды зарубежных ученых A. Krzan, L. Liu, D. Zhang, N.D. Pingale, S.R. Shukla, M. Hajek и др. Особенностью работ представленных авторов является узкий круг решаемых задач, ограниченный вопросами оптимизации протекающих реакций химическими способами, такими как выбор типа и концентрации катализаторов, молярного соотношения реагирующих компонент и т.д. под воздействием энергии электромагнитного поля СВЧ-диапазона. При этом экспериментальные исследования процессов деполимеризации представлены лишь лабораторными опытами в СВЧ установках бытового назначения, либо в специализированных устройствах для

химического синтеза при малом объеме проб. Вопросы выбора режима и частоты воздействия, проектирования и создания специализированных лабораторных и промышленных СВЧ-устройств переработки ПЭТФ, управления параметрами электродинамического воздействия остаются без рассмотрения.

Разработки российских ученых ограничены трудами сотрудников РХТУ им. Д.И. Менделеева (Москва), УГНТУ (Уфа), СГТУ (Самара), ТГТУ (Тамбов), КНИТУ (Казань), НИЦ им. Н. Тесла (Йошкар-Ола) по близким тематикам, не затрагивающих переработку ПЭТФ. В указанных работах основное внимание уделено разработке промышленных электродинамических реакторов СВЧ-диапазона с адаптивным управлением по температуре и давлению обрабатываемой смеси в ходе протекания химических реакций, изменение электрофизических свойств, определяющее эффективность воздействия на нее энергии ЭМП СВЧ-диапазона, практически не учитывается.

Отмеченные выше обстоятельства определяют актуальность научно-технической задачи разработки СВЧ-устройств для создания электродинамических реакторов деполимеризации ПЭТФ.

Представляемая диссертационная работа посвящена решению этой проблемы. Тематика и содержание работы соответствуют планам научных исследований, являющихся составной частью федеральной целевой программы «Исследования и разработки по приоритетным направлениям развития научно-технологического комплекса России на 2007-2013 годы» (государственный контракт № 16.513.11.3114) и государственного задания на оказание услуг (выполнение работ) по организации научных исследований, выполняемых ФГБОУ ВПО «КНИТУ-КАИ» на кафедре телевидения и мультимедийных систем и в научно-исследовательском институте прикладной электродинамики, фотоники и живых систем (программа «Симметрия»).

Цель работы – создание лабораторных и промышленных электродинамических реакторов деполимеризации полиэтилентерафталата с адаптивным управлением параметрами электродинамического воздействия в ходе технологического процесса на основе разработанных СВЧ-устройств.

Основная задача научных исследований – разработка принципов построения, методов анализа и синтеза СВЧ-устройств для создания электродинамических реакторов переработки ПЭТФ на основе исследования распространения ЭМП СВЧ-диапазона в используемой гетерогенной реакционной смеси и адаптивного технологического воздействия на указанную смесь с учетом изменения электрофизических свойств ее компонент в ходе деполимеризации.

Решаемые задачи:

Анализ характеристик существующих и перспективных реакторов переработки полиэтилентерафталата; выявление резервов для улучшения их энергетических и экологических характеристик, основанных на использовании энергии электромагнитного поля СВЧ-диапазона, а также адаптивного управления параметрами электродинамического воздействия в ходе технологического процесса; определение на этой основе направлений и задач дальнейших научных исследований.

Построение одномерной стационарной математической модели деполимеризации полиэтилентерафталата, инициируемой воздействием энергии электромагнитного поля СВЧ-диапазона с учетом температурной и частотной зависимости диэлектрических свойств реакционной смеси; выработка на базе результатов проведенных вычислительных экспериментов предложений и рекомендаций по разработке и проектированию СВЧ-устройств для создания лабораторных электродинамических реакторов деполимеризации вторичного полиэтилентерафталата; создание лабораторных электродинамических реакторов СВЧ-диапазона и экспериментальная верификация на их основе результатов математического моделирования.

Развитие теории решеток Брэгга на коаксиальном кабеле СВЧ-диапазона и разработка методов анализа их характеристик; разработка решеток Брэгга на коаксиальном кабеле СВЧ-диапазона простой и сложной структуры и методик их использования в качестве сенсоров для оценки температурной и частотной зависимости диэлектрических свойств реакционной смеси в целях адаптивного управления параметрами электродинамического воздействия в ходе технологического процесса.

Разработка, создание и экспериментальные исследования опытного образца промышленного электродинамического реактора для деполимеризации полиэтилентерафталата с адаптивным управлением параметрами электродинамического воздействия в ходе технологического процесса; разработка практических рекомендаций и исходных данных для их проектирования; внедрение результатов исследований.

Методы исследования, достоверность и обоснованность. При выполнении данной работы применялись методы описания линий передач с помощью матриц и ориентированных графов, для математического моделирования - метод конечных разностей.

Обоснованность и достоверность результатов определяются использованием известных положений фундаментальных наук; корректностью используемых математических моделей и их адекватностью реальным физическим процессам; совпадением теоретических результатов с данными экспериментов, результатами опытной эксплуатации созданных устройств.

При решении задач использованы современные программные средства, в том числе стандартные пакеты прикладных программ Mathcad 15.0, MATLAB 7.0.1 и CST Microwave Studio 2011.

Научная новизна полученных результатов состоит в:

Проведен системный анализ характеристик существующих и перспективных реакторов переработки полиэтилентерафталата, по результатам которого определены резервы для улучшения их энергетических и экологических характеристик, основанных на использовании энергии электромагнитного поля СВЧ-диапазона, а также адаптивного управления параметрами электродинамического воздействия в ходе технологического процесса.

Разработана одномерная стационарная математическая модель деполимеризации полиэтилентерафталата, инициируемой воздействием энергии электромагнитного поля СВЧ-диапазона с учетом температурной и частотной зави-

симости диэлектрических свойств реакционной смеси, позволяющая сформулировать рекомендации для обеспечения оптимальных режимов электродинамического воздействия.

Развита теория решеток Брэгга на коаксиальном кабеле СВЧ-диапазона и предложен матричный метод анализа их характеристик, предоставляющий возможность описания динамических свойств структуры; разработаны методики использования решеток Брэгга на коаксиальном кабеле СВЧ-диапазона простой и сложной структуры в качестве сенсоров для оценки температурной и частотной зависимости диэлектрических свойств реакционной смеси в целях адаптивного управления параметрами электродинамического воздействия в ходе технологического процесса.

На базе разработанных методов, моделей и методик разработаны принципы построения и структуры СВЧ-устройств для создания лабораторных и электродинамических реакторов для деполимеризации полиэтилентерафталата и адаптивного управления параметрами электродинамического воздействия в ходе технологического процесса. Предложенная технология построения реакторов позволяет на 20-25 % уменьшить энергетические затраты по сравнению с традиционными технологиями.

Практическая ценность работы. Совокупность результатов, полученных в процессе выполнения диссертационной работы, убедительно доказывает возможность создания СВЧ-устройств для разработки лабораторных и электродинамических реакторов для деполимеризации полиэтилентерафталата и адаптивного управления параметрами электродинамического воздействия в ходе технологического процесса. Подтверждением этому являются разработанные СВЧ-устройства, а именно: опытные образцы лабораторного и промышленного электродинамических реакторов для деполимеризации полиэтилентерафталата, решетки Брэгга на коаксиальном кабеле СВЧ-диапазона для использования в качестве сенсоров для оценки температурной и частотной зависимости диэлектрических свойств реакционной смеси в целях адаптивного управления параметрами электродинамического воздействия в ходе технологического процесса. При этом достигается значительная экономия энергетических ресурсов, обеспечивается экологичность процесса, упрощается структура адаптивного управления его ходом.

Кроме указанных результатов разработаны рекомендации по разработке, проектированию и расчету указанных СВЧ-устройств.

Реализация и внедрение результатов работы. Результаты работы использовались при выполнении научно-исследовательских работ в рамках федеральной целевой программы «Исследования и разработки по приоритетным направлениям развития научно-технологического комплекса России на 2007-2013 годы» (государственный контракт № 16.513.11.3114 «Разработка СВЧ технологий и создание функционально адаптивных реакторов для промышленной обработки термопластичных и термореактивных полимеров») и государственного задания на оказание услуг (выполнение работ) по организации научных исследований, выполняемых ФГБОУ ВПО «КНИТУ-КАИ» (тема «Симметричные сигналы, волны и поля в решении прикладных задач комплексного

применения микроволновых и оптических технологий наукоемкого машиностроения», шифр «Симметрия»), а также в учебном процессе бакалавриата и магистратуры по направлению 210400 «Радиотехника» и рабочей программе «Микроволновые технологии, процессы и комплексы», что подтверждено соответствующими актами внедрения.

Апробация работы. Основные положения и результаты диссертационной работы докладывались и обсуждались на VI и X-ой МНТК «Физика и технические приложения волновых процессов», Казань, 2007 г., Челябинск, 2010 г., XVII-XIX международных молодежных научных конференциях «Туполевские чтения», Казань, 2009-2011 гг., V МНПК «Авиакосмические технологии и оборудование (АКТО-2010)», Казань, 2010 г., V Межрегиональной НПК «Промышленная экология и безопасность», Казань, 2010 г., ВНТК «Актуальные проблемы радиоэлектроники и телекоммуникаций», Самара, 2010 г., II-ой МНТК «Информационно-измерительные диагностические и управляющие системы. Диагностика – 2011», Курск, 2011 г., 45th Annual Microwave Power Symposium, New Orleans, Louisiana, 2011, VIII-ой международной конференции по теории и технике антенн «ICATT'11», Киев, Украина, 2011 г.

Получена награда на Республиканском конкурсе "50 лучших инновационных идей Республики Татарстан", 2010 г.

Публикации. По материалам диссертации опубликованы 11 научных работ, в том числе 4 статьи в рецензируемых журналах, 7 тезисов докладов.

Структура диссертации. Диссертационная работа состоит из введения, четырех глав, заключения, списка использованной литературы, включающего 103 наименования. Работа без приложений изложена на 136 страницах машинописного текста, включая 61 рисунок и 6 таблиц.

Основные положения, выносимые на защиту:

Результаты системного анализа существующих и перспективных реакторов переработки полиэтиленефталата; рекомендации по улучшению их энергетических и экологических характеристик, основанных на использовании энергии электромагнитного поля СВЧ-диапазона, а также адаптивного управления параметрами электродинамического воздействия в ходе технологического процесса.

Одномерная стационарная математическая модель деполимеризации полиэтиленефталата, инициируемой воздействием энергии электромагнитного поля СВЧ-диапазона с учетом температурной и частотной зависимости диэлектрических свойств реакционной смеси; результаты экспериментальной верификации результатов математического моделирования; рекомендации по разработке и проектированию СВЧ-устройств для создания опытных образцов лабораторных электродинамических реакторов деполимеризации вторичного полиэтиленефталата; создание лабораторных электродинамических реакторов СВЧ-диапазона.

Результаты развития теории решеток Брэгга на коаксиальном кабеле СВЧ-диапазона и матричный метод анализа их характеристик; результаты разработки решеток Брэгга на коаксиальном кабеле СВЧ-диапазона простой и сложной структуры; методики их использования в качестве сенсоров для оценки темпе-

ратурной и частотной зависимости диэлектрических свойств реакционной смеси в целях адаптивного управления параметрами электродинамического воздействия в ходе технологического процесса.

Результаты разработки, создания и экспериментальных исследований опытного образца промышленного электродинамического реактора для деполимеризации полиэтилентерафталата с адаптивным управлением параметрами электродинамического воздействия в ходе технологического процесса; практические рекомендации для их проектирования; результаты внедрения опытных образцов лабораторных и промышленных электродинамических реакторов деполимеризации полиэтилентерафталата.

Личный вклад.

Основные результаты диссертационной работы, обладающие научной новизной и практической ценностью, получены автором самостоятельно и соответствуют пункту 5 паспорта специальности 05.12.07.

Благодарности.

Автор выражает глубокую признательность и благодарность профессору кафедры специальной математики КНИТУ-КАИ, д.т.н. Анфиногентову В.И. за полезные консультации и постоянное внимание к диссертационной работе.

II. СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении дана общая характеристика диссертационной работы: актуальность, цель, задачи исследований, научная новизна и практическая значимость, методы исследований, достоверность, реализация и внедрение полученных результатов, апробация и публикации, основные защищаемые положения. Приведены структура и краткое содержание диссертации.

В первой главе проведен анализ существующих и перспективных технологий переработки ПЭТФ, определены пути улучшения технико-экономических характеристик процесса тепловой обработки и качества конечного сырья на основе применения СВЧ технологий, сформулированы общие принципы адаптивного управления СВЧ технологическими комплексами и предложена схема адаптивной установки, осуществляющей переработку ПЭТФ, и базирующейся на мониторинге параметров объекта обработки и характеристик воздействия средствами резонансных датчиков с решением задач управления методами математического моделирования.

Особенностью технологии деполимеризации ПЭТФ с иницированием энергией электромагнитного поля СВЧ является параметрический характер происходящих электродинамических процессов, выражаемый в изменении электрофизических параметров реагирующих веществ и разнородности свойств реакционных агентов в различных типах деполимеризации (гликолиз, гидролиз, метанолиз и др.). Основной сложностью при разработке СВЧ реакторов является необходимость учета температурных изменений комплексной диэлектрической проницаемости реагирующих компонент в ходе обработки. По причине широких диапазонов изменения действительной части комплексной диэлектрической проницаемости и тангенса угла диэлектрических потерь, в такой же степени претерпевает изменение импеданс высокочастотного тракта, что влечет за собой нерациональное использование СВЧ энергии, либо выход

из строя генератора СВЧ из-за увеличения предельного коэффициента стоячей волны. Принятие мер по корректировке режима работы СВЧ комплекса в процессе воздействия является одной из решающих задач при разработке электродинамических реакторов для СВЧ деполимеризации ПЭТФ.

Принципы функциональной адаптивности в процессах переработки ПЭТФ базируются на законах управления СВЧ воздействием и оптимизации электродинамических характеристик устройств обработки, сформулированных на основе данных экспериментальных исследований (оптимальные время переработки, концентрация реагентов, концентрация катализаторов), результатов математического моделирования, и динамически корректируются в процессе переработки. Структурная схема адаптивного управления комплексом для переработки ПЭТФ показана на рис. 1.

Устройство управления получает исходные данные об объекте переработки, которые могут включать начальную температуру, влажность гранулята, степень загрязненности, наличие примесей иного полимера. Данные показатели могут быть выявлены по измерениям комплексной диэлектрической проницаемости и оптических свойств материала. При превышении уровня влажности полимера над критическим для протекания реакции необходимо произвести предварительную сушку гранулята перед началом переработки. В настоящей работе предлагается



Рис.1. Структурная схема управления адаптивного комплекса для переработки ПЭТФ

реализация адаптивного управления СВЧ комплекса для деполимеризации ПЭТФ на основе двухконтурной цепи мониторинга изменения электрофизических параметров реагирующих сред с последующей регулировкой режимов электродинамического воздействия. Первый контур управления предназначен для регулировки мощности электромагнитного воздействия, второй – для согласования СВЧ тракта при динамическом импедансе. Исполнительными устройствами могут выступать системы загрузки-выгрузки компонент, перемешивающие устройства и механические составляющие подстройки электродинамических параметров СВЧ тракта. Мониторинг изменения параметров материалов в данной работе предлагается организовать с помощью разработанных резонансных датчиков на базе коаксиальных решеток Брэгга.

Вторая глава посвящена математическому моделированию процессов переработки ПЭТФ и экспериментальному исследованию воздействия электромагнитного поля СВЧ на реакцию деполимеризации ПЭТФ при взаимодействии с этиленгликолем (ЭГ).

Рассмотрена задача СВЧ нагрева сложной смеси при нормальном падении на границу раздела из воздуха плоской электромагнитной волны, геометрия

данной задачи показана на рис. 2. Допустим, что толщина слоя ЭГ равна h_1 , толщина слоя смеси ЭГ+ПЭТФ h_2 . Электрофизические параметры каждого слоя различны и зависят от температуры и частоты. Характер дисперсионной и температурной зависимости действительной части комплексной диэлектрической проницаемости ϵ и тангенса угла диэлектрических потерь $\operatorname{tg}\delta$ найдены экспериментально. Высота слоя h_2 зависит от исходного соотношения ЭГ/ПЭТФ. Эффективные параметры гетерогенной системы из дисперсной среды – ПЭТФ и непрерывной среды – ЭГ зависят от объемных долей каждой составляющей $N_{\text{ЭГ}}$ и $N_{\text{ПЭТФ}}$. В реакции гликолиз имеется несколько характерных временных стадий:

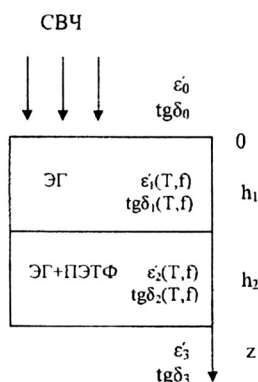


Рис. 2. Нагрев сложной смеси при нормальном падении на ее границу из воздуха плоской электромагнитной волны

1) Стадия нагрева, в течении которой ЭГ нагревается до температуры кипения 197°C .

2) Стадия кипения, в течении которой ЭГ с поверхности переходит в паровую фазу и охлаждаясь в холодильнике, конденсируется обратно. Если принять, что данный процесс является непрерывным, а температура охлажденного ЭГ незначительно превышает температуру приповерхностного слоя, можно принять, что на этой стадии высота слоя h_1 уменьшается на величину объема газообразной фазы, заполняющей холодильник, и температура верхнего граничного слоя уменьшается до температуры охлажденного ЭГ.

3) Стадия образования мономера при температуре кипения ЭГ. Данная стадия характеризуется скоростью преобразования полимера (ПЭТФ) в мономер бисоксизилтерефталат (ВНЕТ), определяемой из экспериментального исследования и зависящей от исходного соотношения ЭГ/ПЭТФ.

После завершения переходных процессов в каждом слое имеется две плоские волны – падающая E_n и отраженная E_o , распространяющиеся вдоль оси z в положительном и отрицательном направлении соответственно. Обозначим через E_n^0 – комплексную амплитуду напряженности электрического поля, падающего на плоскоструктуру из воздуха. Тогда, комплексная амплитуда напряженности магнитного поля будет равна $H_n^0 = E_n^0 / w_0$, где $w_0 = \sqrt{\mu/\epsilon}$ – волновое сопротивление воздуха.

Комплексные амплитуды полей в i -ом слое представим в виде

$$E_i(z) = t_i \cdot \exp(-ik_i z) + r_i \cdot \exp(ik_i z), \quad H_i(z) = (t_i \cdot \exp(-ik_i z) - r_i \cdot \exp(ik_i z)) / w_i,$$

где $t_0 = 1$, а $r_i = 0$, $i = 0, 1, \dots, 3$.

При единичной амплитуде падающей из воздуха волны на плоскоструктуру коэффициенты t_i и r_i называются соответственно коэффициентами прохождения и отражения, w_i – волновое сопротивление i -го слоя, k_i – коэффициент распространения в i -м слое, обладающие комплексным характером в слу-

чае диэлектрика с потерями. Коэффициенты распространения для 1 и 2-го слоя

$$\text{определяются выражением } k_i = \frac{\omega \sqrt{\epsilon_i'(T) - i\epsilon_i''(T)}}{c}.$$

Используя граничные условия на границе раздела сред, получим систему уравнений для определения коэффициентов прохождения и отражения. Тепловые источники в диэлектрике распределены в соответствии с функцией тепловых потерь $q(z) = \frac{1}{2} \cdot \omega \cdot \epsilon'' \cdot \epsilon_0 \cdot |\vec{E}|^2$. Температурное поле в плоскостной структуре описывается системой дифференциальных уравнений теплопроводности:

$$\begin{cases} c_1 \rho_1 \frac{\partial T_1}{\partial t} = \lambda_1 \frac{\partial^2 T_1}{\partial z^2} + q_1(z, t), & t > 0, \quad 0 < z < h_1, \\ c_2 \rho_2 \frac{\partial T_2}{\partial t} = \lambda_2 \frac{\partial^2 T_2}{\partial z^2} + q_2(z, t), & t > 0, \quad h_1 < z < h_2', \end{cases}$$

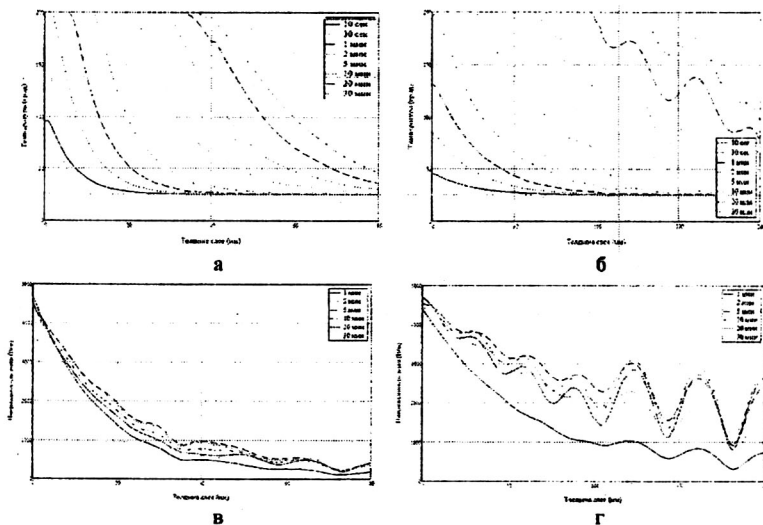


Рис. 3. Результаты численного моделирования процесса СВЧ деполимеризации ПЭТФ

Система уравнений теплопроводности при начальных и граничных условиях решалась конечноразностным методом на сетке, узловые точки которой, совпадают с граничными точками слоев. На рис. 3 показаны результаты численного моделирования в виде графиков распределения температурного поля (рис. 3 а и б) и модуля напряженности электрического поля (рис. 3 в и г) по толщине смеси для различных временных слоев и для частот воздействия 2450 МГц (рис. 3 а и в), 915 МГц (рис. 3 б и г).

Экспериментальное исследование СВЧ деполимеризации ПЭТФ было проведено на примере деструкционной реакции гликолиза с получением мономера ВНЕТ. Данная реакция проводится при атмосферном давлении и температуре 190 - 210°C. Целью эксперимента явилось нахождение оптимальных ре-

жимов воздействия, сравнение с традиционными методами нагрева, влияние различных входных факторов на характеристики конечного продукта.

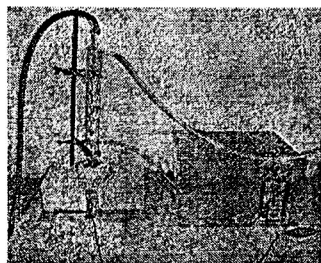
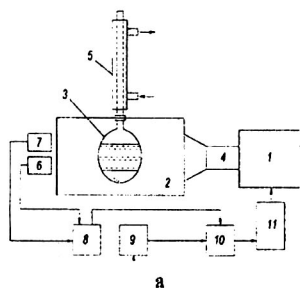


Рис. 4. Структурная схема (а) и общий вид (б) экспериментальной установки для переработки ПЭТФ

Для проведения физического моделирования процесса деполимеризации ПЭТФ была разработана экспериментальная установка (рис. 4), состоящая из источника СВЧ на базе магнетрона (1), генерирующего на частоте 2450 МГц с мощностью 700 Вт и рабочей камеры (2). Рабочая камера представляет собой многомодовый резонатор прямоугольной формы, к которому посредством Е-секториального рупора (4) подсоединяется микроволновый тракт от генератора. В камере располагался стеклянный сосуд с реагирующими веществами объемом 500 мл (3), сопряженный с обратным холодильником (5) через отверстие в верхней стенке камеры. Контроль протекания реакции производится с помощью видекамеры (6) с записью на компьютер (8) и бесконтактного инфракрасного (ИК) датчика температуры (7). Данные о температуре с поверхности колбы подаются на ПИД-регулятор (9), функция которого поддерживает оптимальную температуру реакции путем образования канала обратной связи с формированием управляющих сигналов для системы управления (10) источника питания источника СВЧ (11). Конструкция резонатора определяет максимум напряженности электромаг-

нитного поля в пространстве нахождения нагреваемого сосуда. В данном эксперименте перемешивание реакционной смеси не производилось.

Катализаторами реакции выступали обычные лабораторные химикаты, такие как углекислый натрий, двууглекислый натрий и ацетат цинка. Диапазон изменения соотношения исходного количества ПЭТФ к этиленгликоли составлял от 1:5 до 1:10, концентрация катализаторов находилась в пределах от 1 до 4% от общей смеси. В качестве ПЭТФ применялись бутылки для газированных напитков, предварительно очищенные, промытые, высушенные и измельченные до размеров 5х5 мм. Глубина переработки определялась по формуле

$$Y_{\text{нпгт}} = \frac{A-B}{A} \times 100\%, \text{ где } A - \text{масса исходного ПЭТФ, } B - \text{масса недеполимеризованного ПЭТФ.}$$

Серии экспериментов включали исследование глубины переработки при статичном соотношении ПЭТФ/ЭГ и концентрации катализатора в зависимости от времени, при статичном соотношении ПЭТФ/ЭГ и времени реакции в зависимости от концентрации катализатора, при статичном соотношении концен-

трации катализатора и времени реакции в зависимости от соотношения ПЭТФ/ЭГ.

Сравнительный анализ полученных результатов на всех стадиях экспериментальных исследований проводился с целью определения оптимальных значений массовых соотношений ПЭТФ/ЭГ, типа катализатора, концентрации катализатора от общей доли смеси и времени реакции экстремумы функций получения максимальной переработки полимера.

Наибольший выход ВНЕТ (70%) проявлялся в случае использования ацетата цинка при длительности реакции 45-50 минут (см. рис.5). Количество БОЭТ увеличивается в течении этого времени, после этого наблюдается уменьшение доли мономера. Это объясняется тем, что гликолиз – обратимая реакция равновесия, обратная реакция является поликонденсацией. В случае нагревания классическим способом при прочих равных условиях время деполимеризации составляет 6-7 часов. Для ацетата цинка оптимальная концентрация катализатора составила 2% и оптимальное соотношение ПЭТ/ЭГ=1:10. Анализ химической чистоты полученного ВНЕТ был проведен методом дифференциальной сканирующей калориметрии.

Третья глава посвящена разработке резонансных датчиков на основе коаксиальных решеток Брэгга, предлагаемых для использования в системе мониторинга СВЧ технологического процесса переработки ПЭТФ.

Аналогом волоконной решетки Брэгга в радиочастотной области можно принять структуру, состоящую из коаксиального волновода, обладающего периодическими неоднородностями вдоль основной оси. Частным случаем такого элемента является решетка Брэгга на коаксиальном кабеле (РБКК). Неоднородность в этом случае представляется отверстием во внешнем проводнике и диэлектрическом заполнении кабеля.

Подобно моделям ВРБ, в которых рассматривается взаимодействие распространяющихся и отраженных мод, в РБКК существуют дискретные резонансы, определяемые условием Брэгга $f_p = \frac{m}{2\lambda\sqrt{LC}}$, где m – порядок дифракции

резонансной частоты, λ – период решетки (расстояние между неоднородностями), L и C – погонная индуктивность и емкость коаксиального кабеля. Характерные формы частотных зависимостей модуля и фазы коэффициентов отражения и передачи РБКК показаны на рис.6.а.

В решении задач теоретического анализа частотных характеристик РБКК можно выделить три подхода:

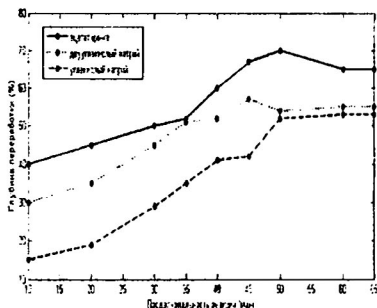


Рис. 5. Зависимость глубины переработки от времени деполимеризации при различных катализаторах

1. Построение модели исследуемой РБКК в программе электродинамического моделирования с последующим расчетом частотных коэффициентов отражения и передачи средствами программного математического аппарата. В большинстве случаев в подобных приложениях используется расчет электромагнитных полей, описываемых дифференциальными уравнениями в частных производных, методом конечных элементов. Положительной стороной данного подхода является высокая точность и достоверность получаемых результатов, недостатком можно указать большие вычислительные затраты и сложность оперативного регулирования параметрами электродинамической структуры.

2. Описание РБКК с помощью четырехполюсной волновой матрицы передачи для численного моделирования частотных характеристик отражения и передачи РБКК, предложенный Jie Huang, Tao Weia, Xinwei Lana, Jun Fanb, Hai Xiaa. Лишен недостатков, характерных для первого метода, но обладает меньшей точностью расчета.

3. Вывод коэффициентов отражения и передачи РБКК методом ориентированных графов для каскадного соединения одинаковых параллельных неоднородностей с расстояниями между ними равной периоду решетки.

В настоящей работе развиты все три подхода.

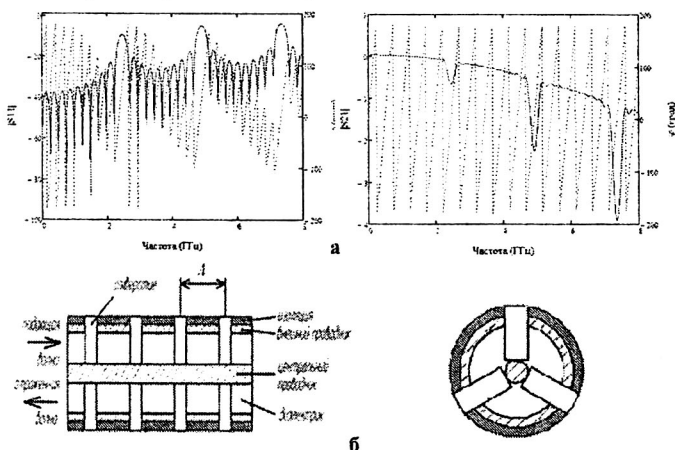


Рис. 6. Коаксиальная решетка Брэгга: а – частотные коэффициенты отражения и передачи, б – структуры основных типов РБКК

Структуру РБКК можно представить как чередование участков однородного коаксиального волновода и участков с неоднородностью, в этом случае удобно использовать распространенный в теории цепей с распределенными параметрами метод декомпозиции на подсхемы. Представим отдельные участки РБКК в виде четырехполюсников с напряжениями падающих и отраженных волн $U_{\text{пад}}^n$ и $U_{\text{отр}}^n$ на соответствующих граничных сечениях $n=1,2,3...$ Наиболее целесообразным в случае РБКК является описание элементарных участков с помощью волновых матриц передачи, при этом общая матрица будет являться произведением матриц отдельных элементов. Вывод матрицы передачи возмо-

жен из матрицы рассеяния, в силу их непосредственной связи. Модуль и фаза частотных S-параметров участков с неоднородностью были получены в программе CST Microwave Studio. Общая Т-матрица РБКК будет определяться произведением матриц передачи участка с неоднородностью и однородного участка, возведенным в степень, равную количеству отверстий в кабеле.

$$\begin{bmatrix} U_{nad}^1 \\ U_{omp}^1 \end{bmatrix} = [T] \begin{bmatrix} U_{omp}^n \\ U_{nad}^n \end{bmatrix} = ([T^o][T^H])^n \begin{bmatrix} U_{omp}^n \\ U_{nad}^n \end{bmatrix} =$$

$$= \begin{bmatrix} \frac{1}{K} e^{-(\alpha+j\beta)\Lambda} & -\frac{\Gamma}{K} e^{(\alpha+j\beta)\Lambda} \\ \frac{\Gamma}{K} e^{-(\alpha+j\beta)\Lambda} & \frac{(K^2 - \Gamma^2)}{K} e^{(\alpha+j\beta)\Lambda} \end{bmatrix}^n \begin{bmatrix} U_{omp}^n \\ U_{nad}^n \end{bmatrix}$$

где n – количество неоднородностей в РБКК, $[T^o]$ и $[T^H]$ – матрицы передачи однородного участка и участка с неоднородностью. После получения конечной Т-матрицы коэффициенты отражения и передачи РБКК будут определяться как

$$S_{11} = \frac{T_{21}}{T_{11}}, S_{21} = \frac{1}{T_{11}}$$

В работе предлагаются следующие принципы использования РБКК в качестве измерительных преобразователей в составе общей системы мониторинга адаптивного СВЧ технологического комплекса, осуществляющего переработку ПЭТФ:

1. Контроль комплексной диэлектрической проницаемости реакционных агентов в процессе обработки при внесении соответствующих жидкостей в неоднородность РБКК. Реакция системы заключается в изменении ширины полосы пропускания коэффициента отражения, резонансной частоты и амплитуды резонанса.

2. Контроль температуры реагирующей смеси по зависимости от температуры диэлектрической проницаемости заполнения кабеля и температурному уширению материалов кабеля.

3. Контроль затягивания частоты магнетрона в зависимости от изменения параметров нагрузки.

На рис.66 представлены структуры изготовленных и исследованных РБКК: с двусторонним расположением отверстий и с расположением отверстий под 120° . Использовался коаксиальный кабель марки RG-213 с волновым сопротивлением 50 Ом и погонной емкостью 98 пФ/м. Диаметр отверстий в диэлектрике кабеля составлял 4 мм, шаг отверстий – 42 мм. Согласно данному выражению выбранный период РБКК, равный 42 мм, определяет резонансную частоту 1-го порядка - 2450 МГц, соответствующую разрешенной частоте воздействия для промышленной СВЧ обработки. Экспериментальное исследование резонансных свойств РБКК проводилось на векторном анализаторе цепей (ВАЦ), обладающий диапазоном измеряемых частот от 100 кГц до 8 ГГц. Лучшую избирательность показала РБКК с расположением отверстий под 120° . В этом случае по-

лоса пропускания контура отражения по уровню -3дВ для первого резонанса составляет 122 МГц.

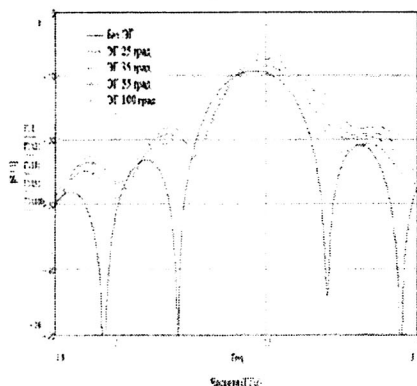


Рис.7. Коэффициент отражения РБКК с различным заполнением

полученные спектральные характеристики коэффициента отражения для РБКК с воздушным заполнением отверстий и с ЭГ различной температуры.

При использовании РБКК в качестве резонансного датчика возникает задача разработки методов и средств определения таких параметров спектра отражения как значение резонансной частоты, амплитуда резонанса и добротность контура, в изменении которых заложена информация о комплексной диэлектрической проницаемости нагреваемой среды. В лабораторных условиях наиболее оптимальным вариантом является использование ВАЦ, при этом точность определения будет зависеть только от технических характеристик ВАЦ и качества согласования с промежуточными линиями передачи. В случае же использования в составе интегрированной системы контроля и управления технологическим процессом необходимо экономичное решение с высокой оперативностью, быстродействием и минимумом воздействия шумов и других искажающих результат факторов.

Известны методы определения свойств резонансных датчиков, основанные на прохождении или отражении от резонансной структуры сигнала от перестраиваемого генератора и регистрации отклика пик-детектором. Общим недостатком указанных методов, назовем их гомодинными или одночастотными, является относительно низкая чувствительность и отношение сигнал/шум измерений, обусловленные необходимостью их проведения в широкой полосе частот, наличием частотной зависимости интенсивности шумов детектора, особенно в низкочастотной области ($\sim 1/f$), флуктуаций мощности генератора и других помех низкочастотной природы, возникающих, например, в линиях, подводящих зондирующий сигнал от генератора к датчику и отводящих его от датчика к детектору.

Для устранения указанных недостатков в работе предложено использование гетеродинного или двухчастотного метода измерений

Проведено совместное численное и имитационное моделирование спектров отражения РБКК при внесении в полость отверстий ЭГ. Эксперимент проводился для различных значений температуры ЭГ и, соответственно, при различных диэлектрических свойствах. При моделировании задавались известные дисперсионные характеристики вещественной части диэлектрической проницаемости и тангенса угла потерь для четырех значений температуры: 25, 35, 55 и 100 °C. На рис. 7 показаны

резонансных характеристик датчика, аналогичного методам мониторинга центральной длины волны волоконно-оптических избирательных структуры настройки контура в резонанс при одностороннем подходе. Данные методы характеризуются применением в качестве зондирующего двухчастотного сигнала, полученного из излучения частотой 1 – 3 ГГц путем амплитудно-фазового преобразования. В результате преобразования излучение на исходной частоте подавляется, формируются две равные по амплитуде и модулю начальной фазы частотные составляющие, расположенные симметрично относительно исходной (средней) и разнесенные на промежуточную частоту, близкую к полосе пропускания датчика на полувысоте. Анализ требуемой измерительной информации, содержащейся в амплитуде и фазе огибающей биений компонент зондирующего сигнала, осуществляется на промежуточной частоте (~ десятки МГц), что позволяет избежать влияния на измерения шумов и флуктуации низкочастотной природы.

Общее выражение для огибающей рефлектометрического двухчастотного сигнала после зондирования контура будет иметь вид

$$U_{\text{вых}} = \sqrt{\frac{A_1^2 + A_2^2}{+2A_1A_2 \cos[(\varphi_2 - \varphi_1) + \Omega t]}} \cos \left\{ \omega t + \varphi_0 + \arctg \left[\frac{\sin[(\varphi_2 - \varphi_1) + \Omega t]}{\frac{A_1}{A_2} + \cos[(\varphi_2 - \varphi_1) + \Omega t]} \right] \right\}$$

Анализ данного выражения показывает, что в момент достижения средней частоты зондирующего сигнала ω резонансной частоты контура линии, коэффициент модуляции огибающей выходного рефлектометрического сигнала максимален и равен 1, а сама огибающая рефлектометрического сигнала по фазе совпадает с огибающей зондирующего сигнала на входе. Подана заявка на патент и полезную модель на устройство, реализующее данный метод.

Четвертая глава посвящена разработке и исследованию элементов согласования высокочастотного тракта с нагрузкой, обладающих динамическими характеристиками; выбору конструкций электродинамических реакторов для деполимеризации ПЭТФ для различных частот возбуждения; созданию и построению экспериментального образца СВЧ установки, предназначенного для химической переработки ПЭТФ в присутствии ЭГ и некоторых катализаторов реакции с получением его мономера ВНЕТ.

В состав экспериментального образца (рис.8) входит рабочая камера цилиндрической формы диаметром 0,59 м и высотой 0,84 м, два одинаковых генераторов СВЧ с взаимной развязкой и общей мощностью 1,4 кВт, блок управления работой генераторов и перемешивающего устройства, реакционный сосуд, совмещенный с обратным холодильником. Реакционный сосуд представляет собой реактор объемом 10 л, размещаемый в рабочей камере СВЧ установки, таким образом реализуется частичное диэлектрическое заполнение рабочего объема.

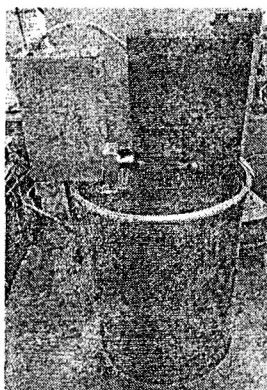
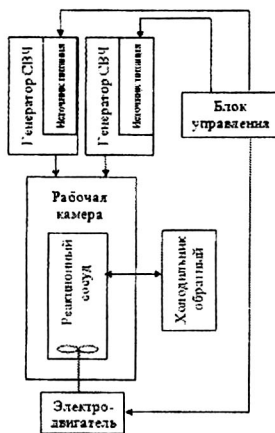


Рис.8. Структурная схема и внешний вид СВЧ установки, осуществляющей переработку ПЭТФ

Реакционный сосуд изготовлен из фторопласта 4 (PTFE), материала обладающего приемлемой совместимостью с используемой химической средой в кипящем состоянии. Реакционный сосуд совмещен посредством фторопластовых труб с обратным холодильником, находящимся за пределами рабочей камеры и необходимым для конденсации паров ЭГ. Внутри реакционного сосуда предусмотрено перемешивание. Два порта ввода энергии расположены на верхней стенке рабочей камеры и находятся в ортогональных плоскостях на расстоянии $3\lambda/4$ (λ — длина волны источника колебаний) для предотвращения взаимных связей между генераторами СВЧ. Оба генератора построены на базе магнетрона с частотой колебаний 2450 МГц и имеют идентичную структуру. Блок управления экспериментального образца СВЧ установки выполняет функции задания времени работы и мощности каждого генератора.

III. ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ РАБОТЫ

Главным результатом диссертационной работы является решение важной научно-технической задачи — разработка принципов построения, методов анализа и синтеза СВЧ-устройств для создания электродинамических реакторов переработки ПЭТФ на основе исследования распространения ЭМП СВЧ-диапазона в используемой гетерогенной реакционной смеси и адаптивного технологического воздействия на указанную смесь с учетом изменения электрофизических свойств ее компонент в ходе деполимеризации.

Кроме того, получены следующие результаты.

- Проведен системный анализ характеристик существующих и перспективных реакторов переработки ПЭТФ; выявлены резервы для улучшения их энергетических и экологических характеристик, основанных на использовании энергии электромагнитного поля СВЧ-диапазона, а также адаптивного управления параметрами электродинамического воздействия в ходе технологического процесса.
- Математически смоделированы процессы деполимеризации ПЭТФ, инициируемой воздействием энергии электромагнитного поля СВЧ-диапазона с учетом температурной и частотной зависимости диэлектрических свойств реакционной смеси; разработаны принципы построения и экспериментально под-

тверждена возможность реализации СВЧ-устройств для создания опытных образцов лабораторных и промышленных электродинамических реакторов деполимеризации ПЭТФ с улучшенными характеристиками по энергетике и экологичности процесса. Временные затраты сокращены в 5 раз при уменьшении энергетических затрат в 5-7 раз и коэффициенте выхода мономера 70%.

- Развита теория решеток Брэгга на коаксиальном кабеле СВЧ-диапазона и осуществлен синтез матричного метода анализа их характеристик; разработаны принципы построения и экспериментально подтверждена возможность реализации двух- и трехрядных решеток Брэгга на коаксиальном кабеле СВЧ-диапазона, отличающихся от одnorядных более высокой добротностью; предложены методики их использования в качестве сенсоров для оценки температурной и частотной зависимости диэлектрических свойств реакционной смеси в целях адаптивного управления параметрами электродинамического воздействия в ходе технологического процесса.

- На базе разработанных моделей, методов и рекомендаций созданы опытные образцы лабораторных и промышленных электродинамических реакторов для деполимеризации ПЭТФ с адаптивным управлением параметрами электродинамического воздействия в ходе технологического процесса; разработаны практические рекомендации и исходных данных для их проектирования.

- Результаты диссертационной работы внедрены в ходе выполнения научно-исследовательских работ по государственному контракту в рамках федеральной целевой программы «Исследования и разработки по приоритетным направлениям развития научно-технологического комплекса России на 2007-2013 годы» и государственного задания на оказание услуг (выполнение работ) по организации научных исследований, выполняемых ФГБОУ ВПО «КНИТУ-КАИ», а также в учебном процессе бакалавриата и магистратуры, что подтверждено соответствующими актами внедрения. Новизна результатов, подтверждена экспертизами Министерства образования и науки по указанным выше НИР и публикациями в рецензируемых журналах, рекомендованных ВАК РФ.

IV. СПИСОК РАБОТ, ОТРАЖАЮЩИХ ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ ДИССЕРТАЦИИ

Статьи в рецензируемых изданиях из списка ВАК:

1. Морозов, О.Г. Микроволновые технологии в процессах переработки и утилизации бытовых полимерных отходов / О.Г. Морозов, А.Р. Насыбуллин, Р.Р. Самигуллин // Известия Самарского научного центра Российской академии наук. – 2010. - Том 12 (33) №4(3). – С. 580-582.

2. Морозов Г.А. Микроволновая обработка термореактивных и термопластичных полимеров / Г.А. Морозов, О.Г. Морозов, А.Р. Насыбуллин, Р.Р. Самигуллин // Физика волновых процессов и радиотехнические системы. – 2011. - Том 14 № 3. – С. 114-121.

3. Морозов Г.А. Функционально адаптивные СВЧ-технологии в задачах переработки термопластичных полимерных материалов / Г.А. Морозов, О.Г. Морозов, А.Р. Насыбуллин, Р.Р. Самигуллин, А.С. Шакиров // Вестник МарГТУ. – 2011. - №3 (13). – С.13-25

10 =

4. Морозов Г.А. Резонансные методы мониторинга технологических процессов отверждения полимеров в функционально адаптивных СВЧ-реакторах / Г.А. Морозов, О.Г. Морозов, А.Р. Насыбуллин, Р.Р. Самигуллин, А.С. Шакиров // Известия Самарского научного центра Российской академии наук. – 2012. – Том 14, №1 (2). – 568-571.

Другие издания:

5. Насыбуллин, А.Р. Применение микроволновых технологий в переработке полиэтилентерефталата / А.Р. Насыбуллин // Туполевские чтения. 18-ая международная молодежная научная конференция: тез. конф. - Казань – 2010.

6. Насыбуллин, А.Р. Исследование возможности применения электромагнитного излучения СВЧ диапазона в процессе переработки бытовых отходов / А.Р. Насыбуллин, Р.Р. Самигуллин // Актуальные проблемы радиоэлектроники и телекоммуникаций: тез. докладов Всероссийской научно-технической конференции. – Самара. – 2010.

7. Морозов, Г.А. Применение микроволновых технологий в нефтяной, авиационной промышленности и наукоемком машиностроении / Г.А. Морозов, О.Г. Морозов, А.Р. Насыбуллин, Р.Р. Самигуллин, А.С. Шакиров // Авиакосмические технологии и оборудование (АКТО-2010): материалы V Международной научно-практической конференции. – Казань. – 2010.

8. Морозов, О.Г. Микроволновые методы переработки отходов ПЭТ-бутылок / О.Г. Морозов, А.Р. Насыбуллин, Р.Р. Самигуллин // Физика и технические приложения волновых процессов. IX Междунар. науч.-техн. конф.: Тез. докл. - Челябинск, 2010.

9. Морозов, О.Г. Микроволновые технологии в процессах рециклинга полимерных бытовых отходов / О.Г. Морозов, А.Р. Насыбуллин, Р.Р. Самигуллин // Промышленная экология и безопасность: сб. тр. участников V Межрегиональной научно-практической конференции. – Казань, 2010.

10. Morozov G. A., Morozov O. G., Nasibullin A.R., Samigullin R.R. Microwave recycling of PET bottles and its technical realization // 45th Annual Microwave Power Symposium. 2011. New Orleans, Louisiana, USA, pp. 163-166

11. Морозов, О.Г. Измерительная система контроля протекания реакции в составе комплекса микроволновой переработки бытовой ПЭТ-тары / О.Г. Морозов, А.Р. Насыбуллин, Р.Р. Самигуллин // Информационно-измерительные диагностические и управляющие системы. Диагностика – 2011: сб. трудов II Международной научно-технической конференции. – Курск, 2011.

Бумага офсетная. Гарнитура Таймс. Формат 90х64₁₆.

Усл. печ. л. 1,63. Уч.-изд. л. 1,25. Печать ризографическая. Тираж 100 экз. Заказ 05/30.

Издательство ЗАО «Новое знание»

420029, г.Казань, ул.Сибирский тракт, 34, корпус 10, офис 6.

Отпечатано с готового оригинал-макета
на полиграфическом участке ЗАО "Новое знание"
г.Казань, ул.Сибирский тракт, 34, корпус 10.